



Pedro de Carvalho Thá

**Estudo das Condições de Fluxo pela Barragem de Terra
da Margem Esquerda de Itaipu**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Tácio Mauro P. de Campos
Co-Orientador: Luiz Alkimin de Lacerda

Rio de Janeiro
Agosto de 2007



Pedro de Carvalho Thá

**Estudo das Condições de Fluxo pela Barragem de Terra
da Margem Esquerda de Itaipu**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada
pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Tácio Mauro P. de Campos

Presidente

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Luiz Alkimin de Lacerda

Lactec/UFPR

Pedricto Rocha Filho

PUC-Rio

Fernando Saboya A. Júnior

UENF

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial
do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de agosto de 2007.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Pedro de Carvalho Thá

Graduou-se em Engenharia Civil, pela Universidade Federal do Paraná, em 2004. Durante a graduação fez parte do programa PET-Civil por um ano e durante três anos foi estagiário do laboratório de geotecnia do Lactec. Desde julho de 2006 é engenheiro da Itaipu Binacional, onde atua na área de segurança de barragens.

Ficha Catalográfica

Thá, Pedro de Carvalho Thá

Estudo das condições de fluxo pela barragem de terra da margem esquerda de Itaipu / Pedro de Carvalho Thá ; orientador: Tácio Mauro P. de Campos ; co-orientador: Luiz Alkimin de Lacerda. - 2007.

99 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Barragens. 3. Fluxo. 4. Itaipu. I. Campos, Tácio Mauro P. de. II. Lacerda, Luiz Alkimin de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

À minha mãe e irmãos, pelo amor e confiança
em mim depositados.

Agradecimentos

Ao meu orientador Tácio, pelo apoio em minha vinda à Itaipu.

Ao meu co-orientador Alkimin, sempre disposto a ajudar.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho da Itaipu, Evangelista, Porchertto, Osako, Monges e Miguel, que sempre se mostraram interessados e dispostos a ajudar. E em especial, ao Fiorini, que participou da elaboração deste trabalho, ajudando tanto na parte técnica quanto dando todas as condições para que pudesse concluí-lo.

Aos meus amigos Leonardo, João, Johan, Julio, Marcelo, Thaís e demais colegas do mestrado, pela convivência.

À CAPES pelo apoio financeiro.

À minha mãe, Rosana, meus irmãos Victor e Fernanda e à minha família, pelo apoio incondicional.

Resumo

Thá, Pedro de Carvalho; de Campos, Tácio Mauro P.; de Lacerda, Luiz Alkimin. **Estudo das Condições de Fluxo pela Barragem de Terra da Margem Esquerda de Itaipu**. Rio de Janeiro, 2007. 118p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A barragem de Itaipu consiste em uma série de estruturas cujo comprimento total é de 7744 m. Uma dessas estruturas é a Barragem de Terra da Margem Esquerda (BTME), cuja extensão é de 1989 m. A BTME está fundada diretamente sobre o solo do local, que consiste em um perfil de intemperismo de basalto, indo desde argila, na superfície, à rocha sã. Seu comportamento é monitorado por 9 piezômetros elétricos, 26 piezômetros standpipe, 12 medidores de nível d'água e seis medidores de vazão. Os medidores de vazão foram inicialmente projetados para medir a água de percolação pelo corpo da barragem. Para tanto, a barragem dispõe de um sistema de canaletas para coletar a água que sai dos filtros internos e conduzi-la aos medidores. Contudo, só ocorre saída de água pelos filtros em pequenos trechos da barragem e não se tinha conhecimento da origem das águas medidas, pois ao longo da operação da usina, alterações foram feitas para drenar áreas alagadas e a água de drenagem foi conduzida ao sistema de canaletas. O objetivo desta dissertação é identificar a origem das águas medidas pelos medidores de vazão e entender como se dá o fluxo pela fundação e corpo da barragem de terra da margem esquerda. Para tanto, utilizou-se um modelo em elementos finitos, com o programa SEEP/W, para oito seções instrumentadas da barragem e procedeu-se correlações estatísticas entre todos os instrumentos da BTME. A principal conclusão obtida foi de que os medidores de vazão medem primordialmente água do reservatório que infiltra pelas fundações e que apenas uma parcela da água infiltrada é medida.

Palavras-chave

Barragens, Fluxo, Itaipu.

Abstract

Thá, Pedro de Carvalho; de Campos, Tácio Mauro P.; de Lacerda, Luiz Alkimin. **Study of Seepage Conditions through Itaipu Left Bank Earthfill Dam.** Rio de Janeiro, 2007. 118p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The Itaipu dam consists of a series of different structures with a total length of 7744m. One of these structures is the Left Bank Earthfill Dam (LBED), whose length is 1989m. The LBED is founded directly in the local soil, which consists of a residual soil of basalt. The behaviour of the earthdam is monitored by 9 electric piezometers, 26 standpipe piezometers, 12 water level indicators and 6 flow meters. The flow meters were initially designed to measure the seepage through the dam body. For this purpose, the dam has a system of ditches to collect the water from the internal filters and to lead the water until a flow meter. However, there is water leaving the internal filters just in a little portion of the dam. In addition, there was no knowledge of the origin of the water that is measured in the flow meters, because many alterations were made in the operation of the dam to drain flooded areas. The drained water was conducted to the system of ditches. This work aims to identify the origin of the water measured in the flow meters and understand the seepage through the dam and its foundation. For this purpose a Finite Element Method analysis for eight instrumented sections was performed using the SEEP/W program. In addition, statistical correlations between data from all instrumentation of the LBED and rainfall were made. The main conclusion is that most of the water measured in the flow meters comes from the reservoir through the foundation. And only a little amount of the total seepage through the foundation is measured.

Keywords

Dams, Seepage, Itaipu.

Sumário

| | |
|---|-----------|
| LISTA DE FIGURAS | 10 |
| LISTA DE TABELAS | 13 |
| LISTA DE FOTOS | 14 |
| LISTA DE ABREVIATURAS | 15 |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 2 A BARRAGEM DE TERRA DA MARGEM ESQUERDA DE ITAIPU | 20 |
| 3 ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOTÉCNICOS..... | 25 |
| 3.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS | 25 |
| 3.2. SOLO RESIDUAL | 27 |
| 3.2.1. Argila Vermelha..... | 28 |
| 3.2.2. Silte Argiloso Amarelo..... | 29 |
| 3.2.3. Solo Saprolítico..... | 29 |
| 3.3. MACIÇO ROCHOSO | 30 |
| 4 INSTRUMENTAÇÃO..... | 32 |
| 4.1. PIEZÔMETROS..... | 32 |
| 4.1.1. Piezômetro Standpipe | 32 |
| 4.1.2. Piezômetro Elétrico de Corda Vibrante..... | 35 |
| 4.1.3. Cotas Piezométricas..... | 36 |
| 4.2. MEDIDOR DE NÍVEL DE ÁGUA | 38 |
| 4.3. MEDIDOR DE VAZÃO..... | 40 |
| 4.3.1. Medidor de Vazão de Placa Triangular | 40 |
| 4.3.2. Tubos de Drenagem | 44 |
| 4.4. LOCALIZAÇÃO DOS INSTRUMENTOS | 45 |
| 5 MODELO EM ELEMENTOS FINITOS | 48 |
| 5.1. MODELAGEM DAS SEÇÕES INSTRUMENTADAS | 48 |
| 5.2. CÁLCULO DAS VAZÕES PELA BARRAGEM | 55 |
| 5.3. MODELAGEM DA SEÇÃO DA ESTACA 133 + 50..... | 56 |

| | |
|--|-----------|
| 6 ANÁLISE ESTATÍSTICA | 60 |
| 6.1. INTRODUÇÃO | 60 |
| 6.2. ASPECTOS TEÓRICOS | 61 |
| 6.2.1. <i>Correlação Linear</i> | 61 |
| 6.2.2. <i>Coeficiente de Correlação Linear</i> | 62 |
| 6.2.3. <i>Coeficiente de Correlação Linear Amostral</i> | 63 |
| 6.3. RESULTADOS DAS CORRELAÇÕES..... | 64 |
| 6.4. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CHUVA NAS VAZÕES DOS MEDIDORES.... | 81 |
| 7 ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES | 86 |
| 7.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS | 86 |
| 7.1.1. <i>MVL1</i> | 86 |
| 7.1.2. <i>MVL2</i> | 86 |
| 7.1.3. <i>MVL3</i> | 89 |
| 7.1.4. <i>MVL 4 e MVL5</i> | 90 |
| 7.1.5. <i>MVL6</i> | 91 |
| 7.2. CONCLUSÕES..... | 92 |
| REFERÊNCIAS..... | 96 |
| ANEXOS..... | 99 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Aspecto geral da Barragem de Itaipu | 17 |
| Figura 2– Níveis do reservatório | 18 |
| Figura 3 – Seções Típicas da BTME | 21 |
| Figura 4 – Perfil Geológico na Área da Barragem de Itaipu | 26 |
| Figura 5 – Perfil Típico de Solo na Região da Barragem de Itaipu | 27 |
| Figura 6 – Piezômetro Standpipe | 33 |
| Figura 7– PSL10 | 34 |
| Figura 8– PSL21 | 35 |
| Figura 9 – Piezômetro de Corda Vibrante | 36 |
| Figura 10– PGL01 | 36 |
| Figura 11 – Curvas de mesma Cota Piezométrica para os piezômetros instalados na argila | 37 |
| Figura 12 – Curvas de mesma Cota Piezométrica para os piezômetros instalados no solo saprolítico | 38 |
| Figura 13 – Medidor de Nível de Água (PZL8) | 39 |
| Figura 14– Nível do PZL07 | 39 |
| Figura 15– Superfície Freática a jusante | 40 |
| Figura 16 – Geometria de Medidor de Placa Triangular | 42 |
| Figura 17 – Vazões no Medidor de Vazão de placa Triangular com vértice de 90° para as formulações de Thompson e Gouley e Crimp | 42 |
| Figura 18 – Vazões medidas manualmente no MVL1 | 43 |
| Figura 19 – Vazões medidas manualmente no MVL2 | 43 |
| Figura 20 – Vazões medidas manualmente no MVL3 | 44 |
| Figura 21 – Vazões medidas manualmente no MVL4 | 44 |
| Figura 22 – Vazões do MVL5 | 45 |
| Figura 23 – Vazões do MVL6 | 45 |
| Figura 24 – Modelagem da Seção da Estaca 138 + 50 | 49 |
| Figura 25 – Seção na estaca 123 + 50 | 50 |
| Figura 26 – Seção na estaca 124 + 50 | 51 |
| Figura 27 – Seção na estaca 125 + 50 | 51 |
| Figura 28 – Seção na estaca 127 + 30 | 51 |

| | |
|---|----|
| Figura 29 – Seção na estaca 129 + 50 | 51 |
| Figura 30 – Seção na estaca 132 + 00 | 51 |
| Figura 31 – Seção na estaca 135 + 50 | 51 |
| Figura 32 – Seção na estaca 138 + 50 | 52 |
| Figura 33 – Seção com a freática na estaca 133 + 50 para a camada permeável no contato argila solo saprolítico | 57 |
| Figura 34 – Seção com a freática na estaca 133 + 50 para a camada permeável no solo saprolítico | 57 |
| Figura 35 – Perda de carga ao longo da seção da estaca 123 + 50 no solo saprolítico..... | 60 |
| Figura 36 - Perda de carga ao longo da seção da estaca 123 + 50 na argila vermelha | 61 |
| Figura 37 – Correlação Linear Positiva | 62 |
| Figura 38 – Correlação Linear Negativa..... | 62 |
| Figura 39 – Localização dos piezômetros do solo saprolítico..... | 69 |
| Figura 40 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre piezômetros do solo saprolítico e reservatório | 70 |
| Figura 41 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre piezômetros do solo saprolítico e MVL1 | 70 |
| Figura 42 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre piezômetros do solo saprolítico e MVL2..... | 70 |
| Figura 43 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre piezômetros do solo saprolítico e MVL3..... | 71 |
| Figura 44 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre piezômetros do solo saprolítico e MVL4..... | 71 |
| Figura 45 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre piezômetros do solo saprolítico e MVL5..... | 72 |
| Figura 46 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre piezômetros do solo saprolítico e MVL6..... | 72 |
| Figura 47 – Localização dos Piezômetros da argila | 73 |
| Figura 48 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre piezômetros da argila e reservatório | 73 |
| Figura 49 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre piezômetros da argila e MVL1 | 74 |
| Figura 50 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre piezômetros da argila e MVL2..... | 74 |

| | |
|---|----|
| Figura 51 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre piezômetros da argila e MVL3..... | 75 |
| Figura 52 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre piezômetros da argila e MVL4..... | 75 |
| Figura 53 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre piezômetros da argila e MVL5..... | 76 |
| Figura 54 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre piezômetros da argila e MVL6..... | 76 |
| Figura 55 – Localização dos medidores de nível de água..... | 77 |
| Figura 56 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre medidores | 77 |
| Figura 57 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação amostral entre medidores de nível de água e MVL1 | 78 |
| Figura 58 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre medidores de nível de água e MVL2 | 78 |
| Figura 59 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre medidores de nível de água e MVL3..... | 79 |
| Figura 60 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre medidores de nível de água e MVL 4..... | 79 |
| Figura 61 - Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre medidores de nível de água e MVL5..... | 80 |
| Figura 62 – Curvas de mesmo coeficiente de correlação linear amostral entre medidores de nível de água e MVL6..... | 80 |
| Figura 63 – Vazão no MVL2 e Precipitação Acumulada no dia 19/11/2006 | 83 |
| Figura 64 – Variação da vazão em função da precipitação para o MVL1 | 83 |
| Figura 65 – Variação de vazão em função da precipitação para o MVL2..... | 84 |
| Figura 66 – Variação de vazão em função da precipitação para o MVL3..... | 84 |
| Figura 67 – Vazões no MVL2 e Nível do Reservatório..... | 88 |
| Figura 68 – Medidas do PZL1 e PZL8 | 89 |
| Figura 69– Vazão no MVL6 e Precipitação no PV2 | 91 |

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Características da Argila Vermelha | 28 |
| Tabela 2 Características do Silte Argiloso..... | 29 |
| Tabela 3 - Características do Solo Saprolítico | 30 |
| Tabela 4 – Piezômetros Standpipe por feição..... | 34 |
| Tabela 5 – Permeabilidades Iniciais Utilizadas no Modelo | 50 |
| Tabela 6 – Permeabilidades Ajustadas pelo Modelo..... | 50 |
| Tabela 7 Diferenças entre Cargas Totais de Campo e do Modelo | 53 |
| Tabela 8 – Cotas piezométricas em função da consideração ou não de camada de rocha alterada | 54 |
| Tabela 9 – Vazão em cada seção do modelo | 54 |
| Tabela 10 - Vazões Teóricas | 55 |
| Tabela 11 – Vazões na estaca 133 + 50..... | 57 |
| Tabela 12– Coeficientes r para os medidores de vazão | 65 |
| Tabela 13 – Coeficiente de Correlação Amostral entre MVL2 e nível médio do reservatório em função dos dias de atraso..... | 65 |
| Tabela 14 – Coeficientes de Correlação Amostral entre piezômetros e medidores de nível de água com nível do reservatório e medidores de vazão. | 68 |
| Tabela 15 – Coeficiente de Correlação Amostral entre PGL1 e nível do reservatório em função dos dias de atraso..... | 68 |
| Tabela 16 – Valores de vazão e precipitação utilizados para avaliar a influência da chuva no MVL2 no dia 19/11/2006 | 82 |

Lista de fotos

| | |
|---|----|
| Foto 1 – Canaleta de drenagem próximo à ombreira esquerda | 19 |
| Foto 2 – MVL2 | 22 |
| Foto 3 – MVL3 | 23 |
| Foto 4 – MVL1 e MVL4 | 23 |
| Foto 5 – MVL5 | 23 |
| Foto 6 – MVL6 | 24 |
| Foto 7 – Medidor de Vazão de Placa Triangular | 41 |
| Foto 8 – Drenos na parede da canaleta que conduz a água ao MVL3 | 90 |
| Foto 9 – Canaleta na estaca 128 + 80 | 93 |
| Foto 10 – Caixa de passagem da estaca 122 + 00 | 94 |

Lista de abreviaturas

| | | |
|---------|---|-------------------------------|
| k | : | Coeficiente de Permeabilidade |
| l | : | Litros |
| m | : | Metro |
| min | : | Minuto |
| m.s.n.m | : | Metros sobre o nível do mar |
| s | : | Segundos |